Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 19, No. 1, Spring. 2021, p. 73-89

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، ص. ۸۹-۷۳

مقاله پژوهشی

اثرات محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم و نانوذرات (سیلیسیم+ روی) در مراحل مختلف رشد و نمو بر عملکرد کمی و غنی‌سازی دانه برنج (*Oryza sativa* L.)

مهرداد شیخ‌زاده[1]، حمیدرضا مبصر[2*]، الیاس رحیمی‌پطرودی[3]، محمد رضوانی[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷

چکیده

سیلیس و روی در بین عناصر غذایی نقش کلیدی در بهبود تغذیه و افزایش رشد گیاه برنج دارند. به‌منظور انجام این تحقیق، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با ۳ تکرار در مزرعه شخصی واقع در شهرستان بابل، طی سال‌های ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ اجرا گردید. فاکتورهای آزمایشی شامل محلول‌پاشی در سه سطح (سیلیکات پتاسیم، نانواکسید سیلیسیم و نانواکسید روی) به‌عنوان عامل اول و مراحل رشد و نمو در پنج سطح [(T_1: ابتدای پنجه‌دهی $+T_2$)، (T_2: اواسط پنجه‌دهی $+T_3$)، (T_3: T_4+T_5)، (T_4: اواخر پنجه‌دهی)، (T_5: خوشه‌دهی کامل)] به‌عنوان عامل دوم درنظر گرفته شدند. نتایج نشان دادند که هیچ‌یک از صفات مورد مطالعه تحت اثر سال زراعی قرار نگرفتند. حداکثر عملکرد دانه با محلول‌پاشی نانواکسید سیلیسیم (۷۷۳۳ کیلوگرم در هکتار) و نانواکسید روی (۷۴۹۸ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد، که به‌ترتیب به‌خاطر افزایش تعداد کل خوشه‌چه و درصد خوشه‌چه پر (به‌ترتیب ۱۴۲/۰ خوشه‌چه و ۹۵/۵۳ درصد) و افزایش تعداد کل پنجه و وزن هزار دانه (به‌ترتیب ۱۹/۷۳ پنجه و ۲۶/۸۰ گرم) بود. بالاترین میزان عملکرد دانه (۷۷۱۶، ۷۷۰۰ و ۷۴۹۲ کیلوگرم در هکتار) و درصد خوشه‌چه پر (۹۴/۸۳، ۹۴/۷۲ و ۹۳/۸۹ درصد) به‌ترتیب تحت تیمارهای T_1، T_2 و T_3 به‌دست آمد. بیشترین غلظت سیلیس و روی دانه به‌ترتیب با محلول‌پاشی نانواکسید سیلیسیم تحت تیمار T_1 (۳/۹۷ درصد) و نانواکسید روی تحت تیمار T_2 (۲۱/۶۷ میلی‌گرم در کیلوگرم) به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: روی دانه، سیلیس دانه، عملکرد دانه، نانوکودها

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) به‌عنوان یکی از گیاهان تیره غلات به‌طور وسیعی در سرتاسر دنیا مصرف می‌شود (Choi *et al*., 2015) به‌طوری که منبع غذایی بیش از ۱۵ درصد جمعیت جهان می‌باشد (Fitzgerald *et al*., 2009). یکی از راهکارهای بهبود امنیت غذایی جمعیت رو به افزایش جهان، افزایش مقدار تولید در واحد سطح می‌باشد (Sinclair, 2011). مهمترین عامل مرتبط با تولید محصول، تغذیه صحیح گیاهان است که نقش به‌سزایی در افزایش عملکرد دارد (Mohaghegh *et al*., 2010).

سیلیس و روی در بین عناصر غذایی نقش کلیدی در بهبود تغذیه گیاه و افزایش رشد برنج دارند به‌گونه‌ای که کمبود این عناصر سبب کاهش رشد و متعاقب آن کاهش عملکرد می‌گردد (Sainz *et al*., 1998; Jeer *et al*., 2017). افزایش عملکرد دانه برنج با مصرف عناصر سیلیس و روی را می‌توان به فراهمی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، بهبود فرآیند جذب و انتقال عناصر به اندام‌های هوایی و دانه نسبت داد (Kheyri *et al*., 2019b). جذب سیلیس به‌وسیله گیاه اثرات مفیدی مانند افزایش مقاومت به آفات و بیماری‌ها (Hossain *et al*., 2007)، تحمل به تنش‌های غیر زنده (Liang *et al*., 2005) و بهبود کیفیت و عملکرد محصول (Kamenidou *et al*., 2010) را به‌همراه دارد. اما در صورت کمبود سیلیس، مقدار کلروفیل کم شده و فتوسنتز در گیاه کاهش می‌یابد که به نقش سیلیس در زنجیره فتوسنتزی و ممانعت از تخریب زنجیره کلروفیلی مرتبط می‌باشد (Lobato *et al*., 2009). سیلیس نقشی مؤثر در عملکرد دانه برنج یعنی تعداد دانه بالا و اندازه بزرگ دانه دارد (Lavinsky *et al*., 2016). از طرفی مشخص شد که کاربرد سیلیسیم طی رشد زایشی و در مرحله گلدهی برنج بیشترین تأثیر را در افزایش وزن هزاردانه، تعداد سنبله و عملکرد داشت (Jianfeng *et al*., 1989). با توجه به نقش مثبت سیلیس در بهبود تغذیه عناصر معدنی و تولید برنج، محلول‌پاشی نانوسیلیس می‌تواند مزایای بهتری نسبت به کودهای

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت، واحد قائم شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران
۲- استادیار، گروه زراعت، واحد قائم شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران
۳- استادیار، گروه زراعت، واحد قائم شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران
۴- دانشیار، گروه زراعت، واحد قائم شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: drmobasser.neg@gmail.com)
DOI: 10.22067/jcesc.2021.37184.0

سیلیس معمولی داشته باشد (Wang *et al*., 2015). در همین ارتباط خیری و همکاران (Kheyri *et al*., 2018) نشان دادند که کاربرد سیلیس به‌روش محلول‌پاشی نانوذره میزان جذب سیلیس در دانه و کاه را به‌طور معنی‌داری نسبت به کاربرد خاکی سیلیکات کلسیم و شاهد افزایش داد. برنج رشد یافته تحت شرایط غرقاب به‌دلیل کاهش پتانسیل احیاء و عدم تحرک روی در شرایط بی‌هوازی خاک، قابلیت دسترسی کمتری به جذب روی دارد (Tuyogon *et al*., 2016). بنابراین کمبود روی یکی از عوامل محدودکننده تولید برنج در سراسر دنیا می‌باشد و همچنین یک اختلال تغذیه‌ای گسترده که بر سلامت انسان‌ها تأثیر می‌گذارد (Rehman *et al*., 2012). در واقع کاهش غلظت روی در دانه، سبب کاهش فراهمی زیستی آن در انسان نیز شده و ممکن است به کمبود روی در جمعیت‌های حساس انسانی منجر شود (Hussain *et al*., 2012). کاربرد کود روی، یک استراتژی کلی برای مقابله با کمبود آن در خاک بوده و علاوه بر افزایش عملکرد دانه به افزایش غلظت روی در دانه نیز می‌انجامد (Hussain *et al*., 2012). البته محلول‌پاشی روی سبب بهبود کارآیی مصرف روی در برنج می‌شود (Rehman *et al*., 2012). عبدلی و همکاران (Abdoli *et al*., 2016) نیز افزایش معنی‌دار عملکرد دانه، زیست‌توده و تعداد دانه در سنبله گندم را با کاربرد برگی عنصر روی در مراحل ساقه‌دهی و آغاز پر شدن دانه گزارش دادند. نتایج مطالعه جوکار و همکاران (Joukar *et al*., 2016) نشان داد که زمان کاربرد برگی عناصر غذایی اثر معنی‌داری بر عملکرد، اجزای عملکرد و خصوصیات کیفی دانه برنج رقم طارم ندارد. اما محمودسلطانی و همکاران (Mahmoud Soltani *et al*., 2019) محلول‌پاشی روی در شروع خوشه‌دهی را در افزایش دو برابری میزان روی دانه مؤثر دانستند. افزایش جذب روی و بهبود عملکرد دانه با مصرف روی در مطالعات تویوگان و همکاران (Tuyogon *et al*., 2016) نیز اثبات شده است.

کاربرد برگی عناصر غذایی ضمن کاهش فاصله زمانی بین کاربرد و جذب عناصر غذایی توسط گیاه باعث افزایش جذب و کارایی عناصر غذایی خاک نیز می‌شود. در واقع این روش ضمن افزایش عملکرد موجب کاهش میزان مصرف کودهای شیمیایی در خاک نیز خواهد شد (Bhuyan *et al*., 2012). در این میان نانوکودها در مقایسه با کودهای متداول شیمیایی، راندمان مصرف بالاتری دارند و در نقطه مناسبی از ناحیه رشد، عناصر غذایی خود را آزاد کنند که این عمل اثر معنی‌داری را در خصوصیات رشدی گیاهان ایجاد می‌کند (Mazaherinia *et al*., 2010). با توجه به مطالب آمده در بالا، هدف از انجام این تحقیق بررسی اثرات محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم و نانوذرات‌های سیلیسیم و روی در مراحل مختلف رشد و نمو بر عملکرد دانه و جذب عناصر در برنج می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور انجام این تحقیق، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با ۳ تکرار در مزرعه شخصی واقع در شهرستان بابل، طی سال‌های ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ اجرا گردید. محل اجرای آزمایش در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۴۴ دقیقه طول شرقی واقع شده است که ارتفاع آن از سطح دریا برابر ۲- متر می‌باشد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش برای هر دو سال زراعی در جدول ۱ ارائه شده است. فاکتورهای آزمایشی شامل محلول‌پاشی در ۳ سطح (سیلیکات پتاسیم، نانواکسید سیلیسیم و نانواکسید روی) به‌عنوان عامل اول و مراحل رشد و نمو بر اساس مقیاس بی‌بی‌سی‌اچ[1] در پنج سطح [(T_1: ابتدای پنجه‌دهی[2] + اواسط پنجه‌دهی[3] + اواخر پنجه‌دهی[4] + خوشه‌دهی کامل[5]، T_2: اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_3: اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_4: اواخر پنجه‌دهی و T_5: خوشه‌دهی کامل) به‌عنوان عامل دوم در نظر گرفته شدند. رقم شیرودی با کیفیت مطلوب پخت، مقاوم به آفات و بیماری‌های مهم و عملکرد بالا، رقم مورد مطالعه بود. زمین محل آزمایش بعد از عملیات کامل آماده‌سازی (شخم بهاره، روتیواتور، ماله کشیدن و تسطیح) به سه تکرار مساوی (هر تکرار دارای ۱۵ کرت آزمایشی به ابعاد ۵ × ۲ متر مربع بود) تقسیم شد. نشاءکاری برنج در سال‌های اول و دوم به‌ترتیب در تاریخ‌های ۲۵ و ۲۸ اردیبهشت انجام گرفت. پرورش نشاءها در خزانه به‌صورت جوی و پشته‌ای و به‌روش سنتی تولید گردید و در زمان نشاءکاری، هر کپه با سه نشاء و در فواصل کاشت ۲۵ × ۲۵ سانتی‌متر مربع (عرف منطقه) در کرت‌های آزمایشی نشاء شدند و بعد از آن کرت‌ها بلافاصله به‌صورت غرقاب درآمدند. نشاءکاری در کرت‌ها به‌صورت دستی انجام گرفت.

میزان کودهای فسفر، پتاسیم و نیتروژن بر اساس نتایج تجزیه خاک مشخص شدند که به‌ترتیب ۱۰۰، ۵۰ و ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار بودند و هر کدام بر اساس مساحت هر کرت محاسبه و مورد مصرف قرار گرفتند. فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل، پتاسیم از منبع کلرور پتاسیم و نیتروژن از منبع کود اوره در نظر گرفته شدند. کودهای فسفر و پتاسیم قبل از نشاءکاری و کود نیتروژن با تقسیط در ۳ مرحله (۱/۳ ابتدای کاشت (پایه) + ۱/۳ ظهور خوشه‌آغازین + ۱/۳ خوشه‌دهی کامل) و به‌صورت دستی به کرت‌ها داده شدند. سیلیکات پتاسیم به مقدار ۵ در هزار (Ghasemi *et al*., 2014) و نانواکسید سیلیسیم و نانواکسید روی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر (Ghasemi *et al*., 2017) محلول‌پاشی شدند.

1- BBCH-scale
2- First tiller detectable
3- Stages continuous tillering till 50%
4- Maximum number of tillers detectable
5- Neck node level with the flag leaf auricle, anthers not yet visible

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش قبل از کاشت

Table 1- Physical and chemical properties of soil before planting

خصوصیات خاک Soil characteristics	واحد Unit	۹۷-۱۳۹۶ 2017-18	۹۸-۱۳۹۷ 2018-19
عمق خاک Soil depth	cm	0-30	0-30
هدایت الکتریکی Electrical conductivity	$dS.m^{-1}$	2.33	1.27
اسیدیته خاک/گل اشباع pH		7.48	7.26
ماده آلی Organic matter	%	5..64	2.73
کربن آلی Organic carbon	%	3.27	2.16
درصد مواد خنثی شونده T.N.V	%	15	21
ازت کل N total	%	0.32	0.21
فسفر قابل جذب Available P	$mg.kg^{-1}$	11	6
پتاسیم قابل جذب Available K	$mg.kg^{-1}$	320	238
روی Zn	$mg.kg^{-1}$	0.96	0.89
شن Sand	%	30	27
لای Silt	%	26	33
رس Clay	%	44	40
بافت خاک Soil texture		Clay	Clay

جدول ۲- مشخصات نانوذرات مورد مطالعه

Table 2- Specifications of the studied nanoparticles

نانوذرات Nanoparticles	خلوص Purity percentage (%)	اندازه ذرات Particles size (nm)	تراکم واقعی True density ($g.cm^{-3}$)	سطح ویژه مخصوص SSA ($g.m^{-2}$)	رنگ Color
دی‌اکسید سیلیکون SiO_2	>99%	20 - 30	2.4	180-600	white
اکسید روی ZnO	>99%	10 - 30	5.606	20-60	white

سیلیکات پتاسیم مورد مطالعه بـا ۱۷ درصـد سـیلیس و ۷ درصـد پتاسیم تولید شرکت اگری‌تکنو اسپانیا[1] بود که از شرکت گل‌سم تهیـه شد. نانوذرات مورد استفاده در مطالعه حاضر، تولید شـرکت تحقیقـات نانومواد آمریکا[2] بود که از شرکت پیشـگامان نـانومواد ایرانیـان تهیـه گردید. مشخصات مربوط به نانوذرات در جدول ۲ آمده است.

مبارزه با علف‌های هرز به‌صورت تلفیقی انجام گرفـت. بـه‌منظـور مبارزه شیمیایی از علف‌کش انتخابی بوتاکلر به‌میـزان ۳ تـا ۴ لیتـر در هکتار در ۴ روز پس از نشاءکاری اسـتفاده گردیـد و در صـورت نیـاز، مبارزه به‌صورت دستی نیز انجام گرفت. برای مبارزه با کرم ساقه‌خـوار برنج دو بار از سم دیـازینون (گرانـول ۵٪) بـه‌میـزان ۳۰ کیلـوگرم در هکتار در مراحل انتهای پنجه‌دهی و گلـدهی اسـتفاده شـد. برداشـت بوته‌های برنج به‌صورت دستی و به‌طور کامل از سـطح زمـین انجـام گرفت و نمونه‌ها به‌صورت تصادفی با حـذف اثـرات حاشـیه‌ای از هـر کرت انتخاب شدند و صفات زیر برای هر تیمار آزمایشی مورد بررسی قـرار گرفتنـد (Islam *et al.*, 2007). تعـداد کـل پنجـه در کپـه بـا میانگین‌گیری از روی ۱۲ کپه و طول خوشه و تعداد کل خوشه‌چـه در خوشه با میانگین‌گیری از روی ۲۰ خوشه به‌دست آمد. درصد خوشه‌چه پر در خوشه از نسبت تعداد خوشه‌چه پر به تعداد کل خوشه‌چه در هـر خوشه حاصل شد و به‌صورت درصد بیان گردیـد. وزن هـزار دانـه بـا شمارش ۱۰ نمونه صدتایی و تـوزین آن‌هـا بـه‌دسـت آمـد. عملکـرد بیولوژیک[3] و عملکرد دانه با برداشت تمام کپـه‌هـا از ۴ متـر مربـع از قسمت میانی هـر کـرت محاسـبه گردیـد (Yoshida, 1981). بـدین منظور پس از جدا کردن دانه از بقایای گیاهی به‌مـدت ۲۴ سـاعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شد و بعد از آن با ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد (International Rice Research Institute, 2002). شاخص برداشـت نیـز از نسبـت عملکـرد دانـه بـه عملکـرد

1- AgriTecno
2- US Research Nanomaterials, Inc
3- Biomass

بیولوژیک حاصل شد و به‌صورت درصد بیان گردید. میزان رطوبت دانه‌ها در زمان محاسبه وزن هزار دانه و عملکرد دانه ۱۴ درصد بود. اندازه‌گیری غلظت‌های روی و سیلیس در دانه برنج به‌ترتیب به روش‌های امامی (Imami, 1996) و فلاح و همکاران (Fallah *et al*., 2004) انجام گرفت. داده‌های به‌دست آمده با نرم‌افزار آماری MSTAT–C مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت. نمودارها با نرم‌افزار Excel ترسیم شدند.

نتایج و بحث

طول خوشه

طول خوشه مستقیماً در محاسبه عملکرد نقشی ندارد ولی به‌عنوان یکی از صفات ارزیابی افزایش عملکرد مورد توجه است (Babaeian-Jelodare *et al*., 1999). تجزیه واریانس صفات نشان داد که طول خوشه از نظر آماری تحت هیچ یک از تیمارهای آزمایشی و اثر متقابل بین آن‌ها قرار نگرفت (جدول ۳)، که نتایجی مشابه توسط محمود سلطانی و همکاران (Mahmoud-Soltani *et al*., 2020) ارائه شد.

تعداد کل پنجه در کپه

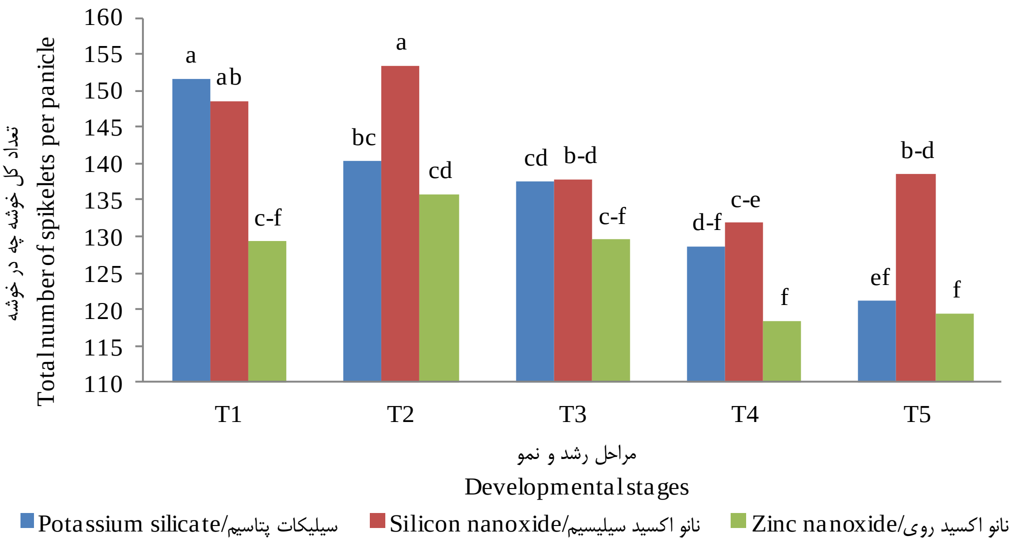
عملکرد دانه برنج به ظرفیت پنجه‌زنی بستگی دارد زیرا با تعداد خوشه در واحد سطح ارتباط نزدیکی دارد (Efisue *et al*., 2014). همان‌طوری که جدول ۳ نشان می‌دهد، تعداد کل پنجه در کپه از نظر آماری تحت اثرهای ساده محلول‌پاشی و مراحل رشد و نمو قرار گرفت و در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. مقایسه میانگین اثرهای ساده صفات (جدول ۴) نشان دادند که با محلول‌پاشی نانواکسید روی (۱۹/۷۳ پنجه) حداکثر تعداد کل پنجه در کپه به‌دست آمد که نشان از اثر مثبت کود روی بر افزایش قدرت پنجه‌زنی گیاه برنج داشت. در واقع عنصر روی با تأثیر بر فرآیندهای شیمیایی مانند سنتز نوکلئوتید، متابولیسم اکسین و فعالیت آنزیم‌ها نقش مؤثری بر تولید پنجه در گیاهان دارد (Mahmoud-Soltani *et al*., 2020). در همین ارتباط محققین گزارش دادند که تعداد پنجه در کپه برنج با مصرف کود سیلیسیم (Khabbazkar *et al*., 2012) و سولفات روی (Ghasemi *et al*., 2014) به‌ترتیب کاهش و افزایش یافت. در ادامه نتایج نیز مشخص شد که بیشترین تعداد کل پنجه در کپه با محلول‌پاشی در ابتدای پنجه‌دهی + اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۲۱/۸۳ پنجه) ثبت شد (جدول ۴)، که گویای اهمیت تغذیه در طول دوره رشد و نمو برنج بود به‌طوری که با کاهش دفعات محلول‌پاشی از تعداد کل پنجه در کپه کاسته شد. رادهیکا و همکاران (Radhika *et al*., 2013) ضمن کاربرد برگی عناصر غذایی بیان داشتند، کاربرد تیمار یک درصد محلول‌پاشی در سه زمان ۱۵ روز پس از نشاء، حداکثر پنجه‌زنی و آغاز تشکیل خوشه دارای بیشترین تعداد پنجه بود.

تعداد کل خوشه‌چه در خوشه

با توجه به تجزیه واریانس صفات مشخص شد که تعداد کل خوشه‌چه در خوشه از نظر آماری در سطح احتمال یک درصد تحت اثرهای ساده محلول‌پاشی و مراحل رشد و نمو و در سطح احتمال ۵ درصد تحت اثر متقابل بین تیمارها معنی‌دار شد (جدول ۳). جدول ۴ نشان می‌دهد که با محلول‌پاشی نانواکسید سیلیسیم (۱۴۲/۰ خوشه‌چه) و نانواکسید روی (۱۲۶/۵ خوشه‌چه) به‌ترتیب حداکثر و حداقل تعداد کل خوشه‌چه در هر خوشه به‌دست آمد. این نتایج علاوه بر اثربخشی مثبت محلول‌پاشی سیلیس بر افزایش تعداد کل خوشه‌چه در خوشه برنج که با نتایج قاسمی و همکاران (Ghasemi *et al*., 2014) مطابقت دارد، برتری کود نانو را نسبت به کودهای معمولی نیز نشان می‌دهد. اثرگذاری بیش‌تر ذرات نانو در مقایسه با ذرات معمول را می‌توان به بالا بودن کارایی جذب و سطح مخصوص این ذرات نسبت داد (Prasad *et al*., 2012). از طرفی دیگر به‌نظر می‌رسد که کاهش تعداد کل خوشه‌چه با محلول‌پاشی نانواکسید روی به‌خاطر افزایش تعداد کل پنجه در کپه و کاهش سهم دریافتی هر پنجه از عوامل محیطی باشد. در ادامه معلوم شد که با محلول‌پاشی در ابتدای پنجه‌دهی + اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۱۴۳/۱ خوشه‌چه) و همچنین در اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۱۴۳/۲ خوشه‌چه) بالاترین تعداد کل خوشه‌چه در خوشه حاصل شد (جدول ۴) که نشان می‌دهد برای افزایش تعداد کل خوشه‌چه در خوشه، دریافت مواد غذایی در اواسط و اواخر پنجه‌دهی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. شکل ۱ نیز گویای این مطلب است که حداکثر تعداد کل خوشه‌چه در خوشه با محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم در ابتدای پنجه‌دهی + اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۱۵۱/۵ خوشه‌چه) و همچنین با محلول‌پاشی نانواکسید سیلیسیم در اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۱۵۳/۳ خوشه‌چه) به‌دست آمد.

درصد خوشه‌چه پر در خوشه

درصد خوشه‌چه‌های پرشده نقش مهمی در افزایش عملکرد برنج خواهد داشت که به عوامل محیطی، شرایط تغذیه‌ای و فتوسنتز گیاه پس از گلدهی بستگی دارد (Mahmoud-Soltani *et al*., 2020). جدول ۳ تجزیه واریانس نشان می‌دهد که از نظر آماری درصد خوشه‌چه پر در خوشه تحت اثرهای ساده محلول‌پاشی و مراحل رشد و نمو قرار گرفت و در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد، به‌طوری که کمترین و بیشترین درصد خوشه‌چه پر در خوشه به‌ترتیب با محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم (۸۸/۷۰ درصد) و نانواکسید سیلیسیم (۹۵/۵۳ درصد) به‌دست آمد (جدول ۴).



شکل ۱- تعداد کل خوشه‌چه در خوشه تحت اثر متقابل محلول‌پاشی با مراحل رشد و نمو

Figure 1- The total number of spikelets per panicle under the interaction of foliar application with developmental stages

T_1: ابتدای پنجه‌دهی + اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_2: اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_3: اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_4: اواخر پنجه‌دهی و T_5: خوشه‌دهی کامل.

T_1: Beginning of tillering + Middle of tillering + Late of tillering + End of panicle emergence, T_2: Middle of tillering + Late of tillering + End of panicle emergence, T_3: Late of tillering + End of panicle emergence, T_4: Late of tillering and T_5: End of panicle emergence.

نتایج این مطالعه حاکی از آن است که نانوذرات توانستند شرایط مناسب‌تری را برای افزایش درصد خوشه‌چه پر ایجاد کنند که از این میان نانوسیلیس موفق‌تر عمل کرد. در واقع ذرات نانو دارای ابعاد بسیار ریزی هستند، لذا سطح ویژه بالایی دارند که این امر واکنش‌پذیری و تحرک بالاتری در گیاه ایجاد می‌کند و باعث می‌شود با سرعت و همگنی بالاتر در گیاه توزیع شود که مجموعه این دلایل افزایش پارامترهای مؤثر در اجزای عملکرد را به‌دنبال دارد (Nair *et al.*, 2010). مشخص شد که سیلیس نقش کلیدی در افزایش تعداد دانه‌های برنج دارد (Lavinsky *et al.*, 2016). افزایش معنی‌دار تعداد دانه در خوشه با افزایش کاربرد سیلیس در سایر مطالعات اثبات شده است (Cuong *et al.*, 2017; Khabbazkar *et al.*, 2012)، که دلیل این افزایش اثربخشی کود سیلیس در تقویت جذب کربوهیدرات در خوشه‌ها گزارش شد (Jawahar *et al.*, 2015). چراکه سیلیسیم با افزایش کلروفیل، فعالیت آنزیم روبیسکو و تعداد و سطح برگ باعث افزایش فتوسنتز و در نتیجه افزایش میزان کربوهیدرات و ذخایر فتوسنتزی می‌شود (Savvas and Ntatsi, 2015). دیگر نتایج آمده در جدول ۴ نشان داد که با محلول‌پاشی در ابتدای پنجه‌دهی + اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۹۴/۸۳ درصد)، اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۹۴/۷۲ درصد) و اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۹۳/۸۹ درصد) بیشترین درصد خوشه‌چه پر در خوشه به‌دست آمد، که نشان از اهمیت تغذیه در اواخر پنجه‌دهی و خوشه‌دهی کامل جهت پر کردن خوشه‌چه‌های بیشتر داشت. به‌نظر می‌رسد کاربرد عناصر ماکرو و میکرو به‌خصوص در مراحل انتهای رشد رویشی و اوایل رشد زایشی نقش مهمی در بهبود فتوسنتز، تجمع مواد فتوسنتزی و در نهایت انتقال آن به دانه‌ها دارد (Mahmodi *et al.*, 2019). لاوینسکی و همکاران (Lavinsky *et al.*, 2016) نیز کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیس در مرحله زایشی (شروع خوشه‌دهی تا خوشه‌دهی کامل) را دلیل افزایش تعداد دانه پر در خوشه برنج دانستند که در این راستا یزدپور و همکاران (Yazdpour *et al.*, 2014a) نتایج مشابهی را گزارش دادند. دیگر محققین بیان داشتند که تیمار محلول‌پاشی عناصر غذایی در سه زمان ۱۵ روز پس از نشاء، حداکثر پنجه‌زنی و آغاز تشکیل خوشه دارای بیشترین تعداد دانه در خوشه را ثبت کرد (Radhika *et al.*, 2013).

وزن هزار دانه

وزن هزار دانه یکی از اجزای مهم عملکرد بوده و تحت تأثیر خصوصیات ژنتیکی گیاه قرار دارد (Aref and Homaei, 2006). نتایج آمده در جدول ۳ نشان داد که وزن هزار دانه از نظر آماری تحت

اثرهای ساده محلول‌پاشی و مراحل رشد و نمو قرار گرفت و در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. مقایسه میانگین اثرهای ساده صفات نشان داد که حداقل و حداکثر وزن هزار دانه به‌ترتیب با محلول‌پاشی نانواکسید سیلیسیم (۲۴/۱۷ گرم) و نانواکسید روی (۲۶/۸۰ گرم) به‌دست آمد (جدول ۴). کاهش تعداد دانه در خوشه، افزایش تعداد پنجه و ماده خشک بوته و همچنین طول خوشه نقش مهمی در تعیین وزن هزار دانه برنج دارد (Mahmodi *et al*., 2019). از نتایج این مطالعه نیز چنین برمی‌آید که گیاه برنج برای تعادل بین اجزای عملکرد، وزن هزار دانه را در مقابل تعداد کل خوشه‌چه در خوشه قرار داد، به‌طوری که با افزایش یا کاهش تعداد کل خوشه‌چه در خوشه، وزن هزار دانه نیز به‌ترتیب کاهش یا افزایش پیدا کرد. البته عنصر روی خود نیز نقش مهمی در تجمع مواد فتوسنتزی در دانه‌ها در طی مرحله پر شدن دانه ایفا می‌کند (El-azeem *et al*., 2014). به‌طوری که محققین دلیل افزایش وزن هزاردانه در اثر مصرف روی را افزایش مواد ذخیره شده، کاهش محدودیت منبع و سرازیرشدن مواد پرورده به سمت دانه (Mahmoud-Soltani *et al*., 2020) و همچنین افزایش و بهبود فرآیند انتقال مجدد مواد غذایی و افزایش انتقال اولیه به‌وسیله تحریک هورمون‌ها و افزایش انتقال در آوند آبکش (Jiang *et al*., 2007) دانستند. فیشر و کوهن (Fischer and Kohn, 2006) نیز دریافتند که با مصرف نانواکسید روی وزن هزار دانه افزایش معنی‌داری نشان داد. دیگر نتایج این مطالعه نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه تنها با یک‌بار محلول‌پاشی در اواخر پنجه‌دهی (۲۷/۰۰ گرم) و خوشه‌دهی کامل (۲۶/۹۴ گرم) ثبت گردید (جدول ۴). محمودی و همکاران (Mahmodi *et al*., 2019) عنوان کردند که اندازه پوست دانه و اندازه نهایی دانه‌ها به‌ترتیب در دو هفته پیش از گلدهی و سه هفته پس از آن تعیین می‌شود. محمودسلطانی و همکاران (Mahmoud-Soltani *et al*., 2020) گزارش دادند که بالاترین وزن هزار دانه با محلول‌پاشی در مرحله خوشه‌دهی و یا مرحله رسیدگی حاصل شد. شایگانی و همکاران (Shaygany *et al*., 2012) طی بررسی دوساله کاربرد برگی عناصر غذایی در مراحل مختلف رشد گیاه برنج، افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه را برای هر دو سال زراعی گزارش کردند، به‌نحوی که بیشترین مقدار آن با محلول‌پاشی عناصر غذایی در مراحل مختلف نشاءکاری، پنجه‌زنی و تشکیل خوشه به‌دست آمد.

عملکرد دانه

با توجه به نتایج آمده در جدول ۵ مشخص شد که عملکرد دانه از نظر آماری تحت اثرهای ساده محلول‌پاشی و مراحل رشد و نمو قرار گرفت و در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. مقایسه میانگین اثرهای ساده صفات (جدول ۶) نشان داد که حداکثر عملکرد دانه به‌خاطر افزایش تعداد کل خوشه‌چه در خوشه و درصد خوشه‌چه پر در خوشه با محلول‌پاشی نانواکسید سیلیسیم (۷۷۳۳ کیلوگرم در هکتار) و به‌خاطر افزایش تعداد کل پنجه در کپه (تعداد خوشه نهایی) و وزن هزار دانه با محلول‌پاشی نانواکسید روی (۷۴۹۸ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد. در خصوص افزایش عملکرد بر اثر مصرف نانوذرات نسبت به کودهای معمولی گزارشاتی توسط معاونی و خیری (Moaveni and Kheiri, 2011). ارائه شد. افزایش عملکرد دانه برنج با کابرد سیلیس توسط دیگر محققین اثبات گردید (Pati *et al*., 2016; Sedaghat *et al*., 2014). این افزایش در عملکرد را می‌توان به اثر مثبت سیلیس در افزایش افراشتگی برگ، بهبود مصرف آب، کاهش تعرق کوتیکولی (Ahstiani *et al*., 2012)، افزایش کارآیی مصرف نور (Ma *et al*., 1989)، افزایش رشد، خصوصیات عملکردی و بهبود جذب عناصر غذایی (Pati *et al*., 2016) نسبت داد. دیگر محققین افزایش عملکرد دانه برنج را با محلول‌پاشی روی اثبات کردند (Mahmoud Soltani *et al*., 2019). که دلیل آن را به نقش روی در افزایش توان فتوسنتزی گیاه و تأمین مواد فتوسنتزی از طریق افزایش شاخص و دوام سطح برگ (Seghatoleslami and Forutani, 2015) نسبت دادند. در همین ارتباط پنام و همکاران (Panam *et al*., 2016) گزارش کردند که نانواکسید روی به‌دلیل سطح ویژهٔ خیلی زیاد و حلالیت زیاد می‌تواند نقش به‌سزایی در فراهمی عناصر کم مصرف برای گیاه و در نتیجه افزایش عملکرد گیاه داشته باشد. دیگر نتایج آمده در جدول ۶ نشان داد که عملکرد دانه پایین، تنها با محلول‌پاشی در اواخر پنجه‌دهی (۷۲۰۹ کیلوگرم در هکتار) و خوشه‌دهی کامل (۷۲۰۱ کیلوگرم در هکتار) ثبت گردید. این نتایج نشان می‌دهد که برای رسیدن به عملکرد دانه بالا در برنج می‌بایست مواد غذایی در مراحل مختلف رشد و نمو مهیا باشد و در این میان مراحل اواخر پنجه‌دهی و خوشه‌دهی کامل بیشتر از سایر مراحل حائز اهمیت می‌باشد. شایگانی و همکاران (Shaygany *et al*., 2012) نتایج مشابهی را گزارش کردند، به‌طوری که طی یک بررسی دوساله دریافتند که بیشترین عملکرد دانه برنج با محلول‌پاشی عناصر غذایی در مراحل مختلف نشاءکاری، پنجه‌زنی و تشکیل خوشه به‌دست آمد. لاوینسکی و همکاران (Lavinsky *et al*., 2016) نیز اظهار داشتند که کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیس در مرحله زایشی (شروع خوشه‌دهی تا خوشه‌دهی کامل) سبب افزایش ۴۵ درصدی عملکرد دانه برنج در مقایسه با عدم مصرف سیلیس گردید. عباسی و همکاران (Abbasi *et al*., 2019) نیز دریافتند که محلول‌پاشی روی با در دسترس قرار دادن سریع مواد غذایی در طی مراحل رشد گیاه با افزایش رشد رویشی، بهبود سیستم فتوسنتزی، افزایش کلروفیل و سطح برگ منجر به افزایش کارایی برگ طی فتوسنتز شده که نتیجه آن افزایش عملکرد است.

عملکرد بیولوژیک

نتایج این مطالعه نشان داد که از نظر آماری عملکرد بیولوژیک تنها تحت اثر ساده محلول‌پاشی قرار گرفت و در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۵).

جدول ۳- تجزیه واریانس طول خوشه، تعداد کل پنجه در کپه، تعداد کل خوشه‌چه در خوشه، درصد خوشه‌چه پر در خوشه و وزن هزار دانه برنج تحت تیمارهای آزمایشی

Table 3- Analysis of variance of panicle length, total number of tillers/hill, total number of spikelets/panicle, percentage of filled spikelets/panicle and 1000 grains weight some of the traits of rice under experimental treatments

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی d.f	طول خوشه Panicle length	تعداد کل پنجه در کپه Total number of tillers per hill	تعداد کل خوشه‌چه در خوشه Total number of spikelets per panicle	درصد خوشه‌چه پر در خوشه Percentage of filled spikelets per panicle	وزن هزار دانه 1000 grains weight
Year (y)	سال	1	0.178	3.21	46.94	0.28	4.90
Repeat in year	تکرار در سال	4	0.878	4.94	265.64	0.51	2.52
Foliar application (a)	محلول‌پاشی	2	0.078	89.41**	1818.68**	351.68**	52.14**
a × y	سال × محلول‌پاشی	2	3.478	7.34	33.08	10.81	2.63
Developmental stages (b)	مراحل رشد و نمو	4	0.628	163.96**	1266.87**	212.15**	38.32**
b × y	سال × مراحل رشد و نمو	4	0.428	0.63	1.08	2.25	0.12
b × a	محلول‌پاشی × مراحل رشد و نمو	8	4.494	3.83	158.37*	8.98	1.46
b × a × y	سال × محلول‌پاشی × مراحل رشد و نمو	8	2.728	1.09	23.05	3.28	1.06
Compound error	خطا مرکب	56	5.842	5.16	72.69	9.86	2.89
CV (%)	ضریب تغییرات (٪)	-	8.8	12.8	6.3	3.4	6.7

ns، **، *: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌داری در سطوح احتمال یک درصد و پنج درصد

ns, **, *: non-statistically significant and significant at 1% and 5%, respectively

جدول ٤- مقایسه میانگین طول خوشه، تعداد کل پنجه در کپه، تعداد کل خوشه‌چه در خوشه، درصد خوشه‌چه پر در خوشه و وزن هزار دانه برنج تحت تیمارهای آزمایشی

Table 4- Comparison of average of panicle length, total number of tillers/hill, total number of spikelets/panicle, percentage of filled spikelets/panicle and 1000 grains weight of rice under experimental treatments

Experimental factors	فاکتورهای آزمایشی	طول خوشه Panicle length (cm)	تعداد کل پنجه در کپه Total number of tillers per hill	تعداد کل خوشه‌چه در خوشه Total number of spikelets per panicle	درصد خوشه‌چه پر در خوشه Percentage of filled spikelets per panicle	وزن هزار دانه 1000 grains weight (g)
Year	سال					
2017-18	۱۳۹۶-۹۷	-	-	-	-	-
2018-19	۱۳۹۷-۹۸	-	-	-	-	-
Foliar application	محلول‌پاشی					
Potassium silicate	سیلیکات پتاسیم	-	16.87 b	135.8 b	88.70 c	25.60 b
Silicon nanoxide	نانواکسید سیلیسیم	-	16.63 b	142.0 a	95.53 a	24.17 c
Zinc nanoxide	نانواکسید روی	-	19.73 a	126.5 c	91.73 b	26.80 a
Developmental stages	مراحل رشد و نمو					
T1		-	21.83 a	143.1 a	94.83 a	24.11c
T2		-	19.50 b	143.2 a	94.72 a	24.00 c
T3		-	17.67 c	134.9 b	93.89 a	25.56 b
T4		-	14.89 d	126.3 c	88.33 b	27.00 a
T5		-	14.83 d	126.4 c	88.17 b	26.94 a

اعداد با حروف مشترک در هر ستون دارای اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد نمی‌باشد.

Means followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 level, using Dunkan's test.

T_1: ابتدای پنجه‌دهی + اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_2: اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_3: اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_4: اواخر پنجه‌دهی و T_5: خوشه‌دهی کامل.

T_1: Beginning of tillering + Middle of tillering + Late of tillering + End of panicle emergence, T_2: Middle of tillering + Late of tillering + End of panicle emergence, T_3: Late of tillering + End of panicle emergence, T_4: Late of tillering and T_5: End of panicle emergence.

جدول ۶ گویای این مطلب است که حداکثر عملکرد بیولوژیک با محلول‌پاشی نانواکسید سیلیسیم و نانواکسید روی (به‌ترتیب ۱۹۲۱۳ و ۱۸۹۸۶ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد. پیوندی و همکاران (Peyvandi *et al*., 2011) کوچک‌تر بودن ابعاد کودهای نانو را موجب جذب بیشتر و سریع‌تر مواد غذایی و به‌تبع افزایش کارایی در کودهای دارای ساختار نانو دانسته‌اند. از این‌رو نانوکودها در مقایسه با کودهای متداول شیمیایی، راندمان مصرف بالاتری دارند و همچنین می‌توانند به‌صورت مطلوب در نقطه مناسبی از ناحیه رشد، عناصر غذایی خود را آزاد کنند که این عمل آثار معنی‌داری را در خصوصیات رشدی گیاهان ایجاد می‌کند (Mazaherinia *et al*., 2010). بهبود رشد برنج با کاربرد نانوسیلیس (Amrullah *et al*., 2015) و نانواکسید روی (Yuva Raj and Subramanian, 2014) توسط محققین گزارش شد. به‌نظر می‌رسد مصرف سیلیکون باعث جهت‌گیری برگ‌ها در مقابل آفتاب و در نتیجه افزایش فتوسنتز و عملکرد گیاه می‌شود (Gottardi *et al*., 2012) که این اثر مفید سیلیکون به تغییرات آناتومیکی به‌وسیله رسوب سیلیکون در دیواره سلولی نسبت داده شده است (Ma and Takahashi, 2002). اما افزایش عملکرد ماده خشک با مصرف عنصر روی به افزایش بیوسنتز اکسین، افزایش آنزیم کربونیک انهیدراز، بهبود عملکرد فتوسیستم‌های نوری، افزایش فعالیت فسفوانول پیرووات کربوکسیلاز و ریبولوز بی‌فسفات کربوکسیلاز، کاهش تجمع سدیم در بافت‌های گیاهی و افزایش جذب نیتروژن و فسفر مرتبط است (Mahmoud-Soltani *et al*., 2020). تمامی عوامل مذکور در افزایش شاخص‌های رشد از قبیل تعداد و اندازه برگ، ارتفاع گیاه و تعداد شاخه‌های جانبی مؤثر می‌باشد و از این طریق عملکرد ماده خشک افزایش می‌یابد (Koochaki, 2013).

شاخص برداشت

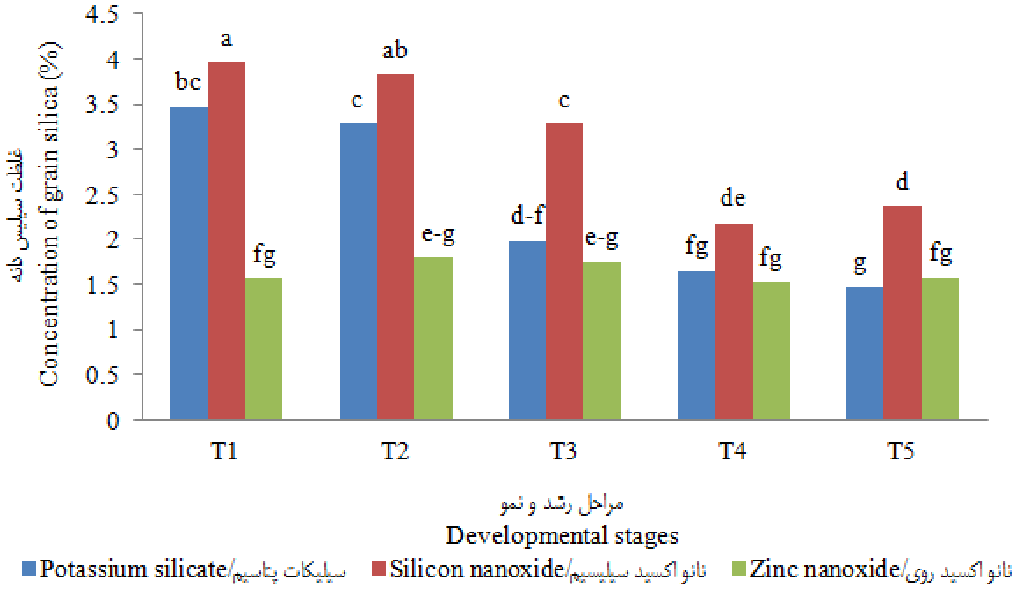
شاخص برداشت بیان‌کننده نسبت مواد فتوسنتزی بین عملکرد اقتصادی و عملکرد بیولوژیک است. این شاخص یکی از معیارهای مورد استفاده در برآورد کارایی توزیع یا انتقال مواد ساخته شده به دانه یا محصول اقتصادی در گیاه می‌باشد (Salardini, 1995). تجزیه واریانس صفات در جدول ۵ نشان داد که شاخص برداشت از نظر آماری تحت هیچ‌یک از تیمارهای آزمایشی و اثر متقابل بین آن‌ها قرار نگرفت که نتایجی مشابه (Cuong *et al*., 2017) و مغایر (Pati *et al*., 2016) با این مطالعه نیز گزارش گردید.

غلظت سیلیس دانه

همان‌طوری که جدول ۵ نشان می‌دهد، غلظت سیلیس دانه از نظر آماری تحت اثرهای ساده محلول‌پاشی و مراحل رشد و نمو و اثر متقابل بین آن‌ها قرار گرفت و در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. مقایسه میانگین اثرهای ساده صفات نشان دادند که با محلول‌پاشی نانواکسید سیلیسیم (۳/۱۲۷ درصد) و نانواکسید روی (۱/۶۴۷ درصد) به‌ترتیب بیشترین و کمترین غلظت سیلیس در دانه به‌دست آمد. در ادامه مشخص شد که حداکثر غلظت سیلیس دانه با محلول‌پاشی در ابتدای پنجه‌دهی + اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۳/۰۰۰ درصد) و همچنین در اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۲/۹۷۲ درصد) ثبت گردید (جدول ۶). اثر متقابل بین تیمارها نیز نشان داد که با محلول‌پاشی نانواکسید سیلیسیم در ابتدای پنجه‌دهی + اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۳/۹۶۶ درصد) بیشترین غلظت سیلیس در دانه ثبت گردید (شکل ۲). کاربرد سیلیسیم در برنج منجر به افزایش این عنصر در اندام‌های هوایی به‌خصوص در دانه‌ها می‌شود (Cuong *et al*., 2017). جذب سیلیسیم در گیاه سیلیس‌دوست برنج از مرحله پنجه‌زنی و یا بعد از طویل شدن ساقه شروع می‌شود (Kato and Owa, 1990). در واقع وقتی سیلیس توسط گیاه جذب می‌شود از طریق تجزیه بیولوژیک و فعالیت‌های آنزیمی شکسته شده و از بافت‌های گیاهی خارج نمی‌شود. به‌همین خاطر، میزان سیلیس در بافت‌های گیاهی افزایش خواهد یافت (Hajipour *et al*., 2019). البته با توجه به قطر نانوذرات انتظار می‌رود سرعت جذب، انتقال و تجمع ذرات نانو بسیار بیش‌تر از ذرات معمول باشد (Torabian and Zahedi, 2013) که در همین ارتباط یزدپور و همکاران (Yazdpour *et al*., 2014) نیز طی دو سال زراعی دریافتند که بیشترین میزان جذب سیلیس در دانه برنج با محلول‌پاشی نانوسیلیکون به‌دست آمد.

غلظت روی دانه

نتایج آمده در جدول ۵ نشان داد که اثرهای ساده محلول‌پاشی و مراحل رشد و نمو و اثر متقابل بین آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر غلظت روی دانه معنی‌دار شد، به‌طوری که حداکثر غلظت روی در دانه برنج با محلول‌پاشی نانواکسید روی (۱۵/۹۷ میلی‌گرم در کیلوگرم) به‌دست آمد. همچنین مشخص شد که با محلول‌پاشی در اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۱۳/۴۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) بیشترین غلظت روی در دانه حاصل گردید (جدول ۶). شکل ۳ نیز نشان داد که حداکثر غلظت روی در دانه با محلول‌پاشی نانواکسید روی در اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل (۲۱/۶۷ میلی‌گرم در کیلوگرم) به‌دست آمد. افزایش محتوای روی دانه برنج در اثر محلول‌پاشی کود روی توسط محققین گزارش شده است (Kheyri *et al*., 2019) که ناشی از افزایش انتقال مجدد روی از برگ‌ها در طول دوره پر شدن دانه می‌باشد (Mahmoud-Soltani *et al*., 2020; Rehman *et al*., 2012).

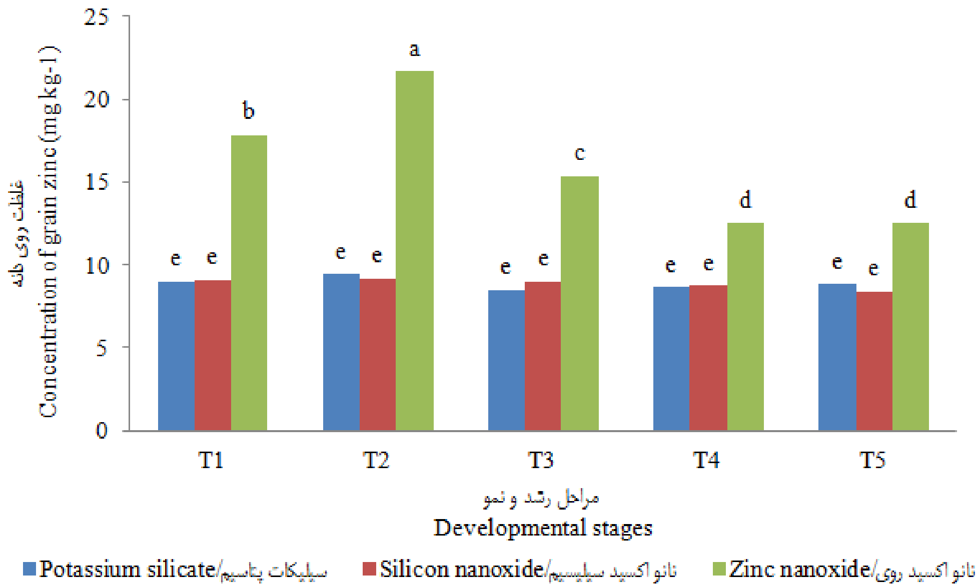


شکل ۲- غلظت سیلیس دانه تحت اثر متقابل محلول‌پاشی با مراحل رشد و نمو

Figure 2- Concentration of grain silica under the interaction of foliar application with developmental stages

T_1: ابتدای پنجه‌دهی + اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_2: اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_3: اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_4: اواخر پنجه‌دهی و T_5: خوشه‌دهی کامل.

T_1: Beginning of tillering + Middle of tillering + Late of tillering + End of panicle emergence, T_2: Middle of tillering + Late of tillering + End of panicle emergence, T_3: Late of tillering + End of panicle emergence, T_4: Late of tillering and T_5: End of panicle emergence.



شکل ۳- غلظت روی دانه تحت اثر متقابل محلول‌پاشی با مراحل رشد و نمو

Figure 3- Concentration of grain zinc under the interaction of foliar application with developmental stages

T_1: ابتدای پنجه‌دهی + اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_2: اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_3: اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_4: اواخر پنجه‌دهی و T_5: خوشه‌دهی کامل.

T_1: Beginning of tillering + Middle of tillering + Late of tillering + End of panicle emergence, T_2: Middle of tillering + Late of tillering + End of panicle emergence, T_3: Late of tillering + End of panicle emergence, T_4: Late of tillering and T_5: End of panicle emergence.

جدول ۵- تجزیه واریانس عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، غلظت سیلیس و روی دانه برنج تحت تیمارهای آزمایشی

Table 5- Analysis of variance of grain yield, biological yield, harvest index, concentration of silica and zinc in grain of rice under experimental treatments

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی d.f	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest index	غلظت سیلیس دانه Concentration of grain silica	غلظت روی دانه Concentration of grain zinc
Year (y)	سال	1	82749.3ns	5376311.2ns	8.040ns	0.036ns	2.147ns
Repeat in year	تکرار در سال	4	188927.3	2338075.8	17.906	0.358	1.218
Foliar application (a)	محلول‌پاشی	2	2486228.9**	11089491.7*	6.642ns	16.430**	503.154**
a × y	سال × محلول‌پاشی	2	54221.4ns	53611.2ns	0.365ns	0.265ns	0.126ns
Developmental stages (b)	مراحل رشد و نمو	4	1145787.8**	5970452.8ns	2.036ns	6.344**	39.524**
b × y	سال × مراحل رشد و نمو	4	10981.7ns	106953.9ns	0.544ns	0.082ns	0.198ns
b × a	محلول‌پاشی × مراحل رشد و نمو	8	90643.2ns	2790679.4ns	6.521ns	1.512**	26.023**
b × a × y	سال × محلول‌پاشی × مراحل رشد و نمو	8	277052.2ns	3186645.6ns	3.033ns	0.017ns	0.892ns
Compound error	خطا مرکب	56	207814.2	2895830.5	6.696	0.132	1.801
CV (%)	ضریب تغییرات (٪)	-	6.1	9.1	6.5	15.2	11.9

ns، **، *: به‌ترتیب غیر معنی دار، معنی‌داری در سطوح احتمال یک درصد و پنج درصد

ns, **, *: non-statistically significant and significant at 1% and 5%, respectively

جدول ٦- مقایسه میانگین عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، سیلیس دانه و روی دانه برنج تحت تیمارهای آزمایشی

Table 6- Comparison of average of grain yield, biological yield, harvest index, concentration of silica and zinc in grain of rice under experimental treatments

Experimental factors	فاکتورهای آزمایشی	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha^{-1})	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha^{-1})	شاخص برداشت Harvest index (%)	غلظت سیلیس دانه Concentration of grain silica (%)	غلظت روی دانه Concentration of grain zinc (mg.kg^{-1})
Year	سال					
2017-18	۱۳۹۶-۹۷	-	-	-	-	-
2018-19	۱۳۹۷-۹۸	-	-	-	-	-
Foliar application	محلول‌پاشی					
Potassium silicate	سیلیکات پتاسیم	7160 b	18065 b	-	2.373b	8.877b
Silicon nanoxide	نانواکسید سیلیسیم	7733 a	19213 a	-	3.127a	8.877b
Zinc nanoxide	نانواکسید روی	7498 a	18986 a	-	1.647c	15.97a
Developmental stages	مراحل رشد و نمو					
T1		7716 a	-	-	3.000a	11.96b
T2		7700 a	-	-	2.972a	13.43a
T3		7492ab	-	-	2.339b	10.94c
T4		7209 b	-	-	1.789c	9.950d
T5		7201 b	-	-	1.811c	9.927d

اعداد با حروف مشترک در هر ستون دارای اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد نمی‌باشد.

Means followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 level, using Dunkan's test.

T_1: ابتدای پنجه‌دهی + اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_2: اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_3: اواخر پنجه‌دهی + خوشه‌دهی کامل، T_4: اواخر پنجه‌دهی و T_5: خوشه‌دهی کامل.

T_1: Beginning of tillering + Middle of tillering + Late of tillering + End of panicle emergence, T_2: Middle of tillering + Late of tillering + End of panicle emergence, T_3: Late of tillering + End of panicle emergence, T_4: Late of tillering and T_5: End of panicle emergence.

طی مطالعه‌ای کـه وو و همکـاران (Wu *et al.*, 2010) بـر روی ژنوتیپ‌های برنج بـا میـزان روی دانـه بـالا و پـایین انجـام داده‌انـد، مشخص شد که محلول‌پاشی کـود روی در مرحلـه آبسـتنی و مرحلـه گرده‌افشانی سبب انتقال بیشتر روی از برگ پـرچم بـه دانـه‌هـا شـد. شـیوای و همکـاران (Shivay *et al.*, 2016) عنـوان کردنـد کـه محلول‌پاشی روی طی سه مرحله از رشد گیاه سبب جذب بیشتر روی در دانه نسبت به محلول‌پاشی یک‌باره و کاربرد خاکی آن می‌گردد که با نتایج این مطالعه مطابقـت دارد. وایتـی و چمبلـیس (Whitty and Chambliss, 2005) نیـز اظهـار داشـتند، مصـرف برگـی عناصـر کم‌مصرف مانند روی به دفعات متعدد مـی‌توانـد در رفـع کمبـود ایـن عنصر کمک کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه از یک‌طرف اثربخشی نانوکودها و از طرف دیگر اهمیت هر یک از مراحل رشد و نمو را به‌منظور تقویت کمی و کیفـی دانه برنج نشان دادند. نانواکسید سیلیسیم از طریق افزایش تعداد کـل خوشه‌چه و درصد خوشه‌چه پر در خوشـه و نانواکسـید روی از طریـق افزایش تعداد کل پنجه در کپه و وزن هزار دانه، توانسـتند هـر کـدام به‌تنهایی عملکرد دانه را افزایش دهند. همچنین مشخص شد کـه بـا محلول‌پاشی در اواسط پنجه‌دهی، اواخر پنجه‌دهی و خوشه‌دهی کامل می‌توان هم‌زمان کمیت و کیفیت دانه برنج را افزایش داد. نهایتاً اثبات شد که محلول‌پاشی نانوذرات در اواسط پنجه‌دهی + اواخر پنجه‌دهـی + خوشه‌دهی کامل به‌منظور غنی‌سازی دانه برنج ضروری‌است.

References

1. Abbasi, N., Cheraghi, J., and Hajinia, S. 2019. Effect of micronutrients of iron and zinc in nano and chemical foliar on on physiological characteristics and grain yield of two bread wheat cultivars. Crop Physiology Journal 11 (43): 85-104. (in Persian with English abstract).
2. Abdoli, M., Esfandiari, A., Mousavi, S., Sadeghzadeh, B., and Saeidi, M. 2016. The effect of seed zinc internal content and foliar application of zinc sulfate on yield and storage compositions of wheat grain. Crop Physiology Journal 7 (28): 91-106. (in Persian with English abstract).
3. Ahstiani, A. F., Kadir, J., Nasehi, A., Hashemian-Rahaghi, S. R., and Sajili, H. 2012. Effect of silicon on rice blast disease. Pertanika Journal Tropical Agricutural Science 35: 1-12.
4. Amrullah, Sopandie, D., Sugianta, and Junaedi, A. 2015. Influence of nano-silica on the growth of rice plant (*Oryza sativa* L.). Asian Journal of Agricultural Research 9 (1): 33-37.
5. Aref, M., and Homaei, M. 2006. The effect of foliar micronutrients zinc and manganese on yield and yield components. First Edition. Tarbiat Modarres University Press, 124 p. (in Persian).
6. Babaeian-Jelodare, N., Nematzadeh, Gh. A., Karbalai, M. T., and Taeb. M., 1999. Evaluation of diversity of agronomic traits in native rice of Mazandaran. Journal of Medical Science 7 (26): 15-26. (in Persian with English abstract).
7. Bhuyan, M. H. M., Ferdousi, R., and Igbal, M. T. 2012. Foliar spray of nitrogen fertilizer on raised bed increases yield of transplanted aman rice over conventional method. International Scholarly Research Network Agronomy 15: 1-8.
8. Choi, S., Jun, H., Bang, J., Chung, S. H., Kim, Y., Kim, B. S., Kim, H., Beuchat, L. R. and Ryu, J. H. 2015. Behavior of aspergillus flavus and fusarium graminearum on rice as affected by degree of milling, temperature, and relative humidity during storage. Food Microbiology 46: 307-313.
9. Cuong, T. X., Ullah, H., Datta, A., and Han, T. C. 2017. Effects of silicon- based fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of rice in tropical zone of Vietnam. Rice Science 24: 283-290.
10. Efisue, A. A., Umunna, B. C., and Orluchukwu, J. A. 2014. Effects of yield components on yield potential of some lowland rice (*Oyza sativa* L.) in coastal region of Southern Nigeria. Journal of Plant Breeding and Crop Science 6 (9): 119-127.
11. El-azeem, A., Salem, K., Abdullah, A., and Al-Doss, A. 2014. Performance of some wheat genotypes affected by different nitrogen, potassium and zinc foliar applications. Life Sciences 11: 742-748.
12. Fallah, A., Visperas, R. M., and Alejar, A. A. 2004. The interactive effect of silicon and nitrogen on growth and spikelet filling in rice (*Oryza sativa* L.) Philipp. Agricultural Scientists 87: 174-176.
13. Fischer, R. A., and Kohn, G. D. 2006. The relationship of grain yield to vegetative growth and post flowering leaf area in wheat crop under conditions of limited soil moisture. Australian Journal of Agricultural Research 17: 281-295.
14. Fitzgerald, M. A., McCouch, S. R., and Hall, R. D. 2009. Not just a grain of rice: The quest for quality. Trends in Plant Science 14 (3): 133-139.
15. Ghasemi, M., Mobasser, H. R., Asadi-Manesh, H., and Gholizadeh, A. L. 2014. Investigating the effect of potassium, zinc and silicon on grain yield, yield components and their absorption in grain rice (*Oryza sativa* L.).

Electronic Journal of Soil Management and Sustainable Production. 4 (2): 1-24. (in Persian with English abstract).
16. Ghasemi, M., Noormohammadi, Gh., Madani, H., Mobasser, H. R., and Nouri, M. Z. 2017. Effect of foliar application of zinc nano oxide on agronomic traits of two varieties of rice (*Oryza sativa* L.). Crop Research 52 (6): 195-201.
17. Gottardi, S., Iacuzzo, F., Tomasi, N., Cortella, G., Manzocco, L., Pinton, R., Romheld, V., Mimmo, T., Scampicchio, M., Dalla Costa, L., and Cesco, S. 2012. Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* (L.) Laterr) plants. Plant Physiology and Biochemistry 56: 14-23.
18. Hajipour, H., Jabbarzadeh, Z., and Rasouli-Sadaghiani, M. H. 2019. Effect of Foliar Application of Silica on some Growth, Biochemical and Reproductive Characteristics and Leaf Elements of Chrysanthemum (*Dendranthema*×*Grandiflorum* cv. Fellbacher Wein). Journal of Soil and Plant Interactions 10 (1): 29-46. (in Persian with English abstract).
19. Hossain, M. T., Soga, K., Wakabayashi, K., Kamisaka, S., Fujii, S., Yamamoto, R., and Takayuki, H. 2007. Modification of chemical properties of cell walls by silicon and its role in regulation of the cell wall extensibility in oat leaves. Journal Plant Physiology 164: 385-393.
20. Hussain, S., Maqsood, M. A., Rengel, Z., and Aziz, T. 2012. Biofortification and estimated human bioavailability of zinc in wheat grains as influenced by methods of zinc application. Plant and Soil 361 (1-2): 279-290.
21. Imami, A. 1996. Methods of plant decomposition. Technical Journal of Soil and Water Research Institute of Iran. 982(1), Publications of Soil and Water Research Institute of Iran, Tehran. (in Persian).
22. International Rice Research Institute, 2002. Find out how the qualities of rice are evaluated and scored in this authoritative source book. Standard Evaluation System for Rice. 1-54 pp.
23. Islam, M. S., Peng, Sh., Visperas, R. M., and Ereful, N. 2007. Lodging- related morphological traits of hybrid rice in a tropical irrigated ecosystem. Field Crops Research 101 (2): 240-248.
24. Jawahar, S., Vijayakumar, D., Bommera, R., Jain, N. 2015. Effect of silixol granules on growth and yield of rice. International Journal of Current Research and Academic Review 3: 168-174.
25. Jeer, M., Telugu, U. M., Voleti, S. R., and Padmakumari, A. P. 2017. Soil application of silicon reduces yellow stem borer, scripophage incertulas (Walker) damage in rice. Journal of Applied Entomology 141 (3): 189-201.
26. Jianfeng, M., Kazuo, N., and Eiichi, T. 1989. Effect of silicon on the growth of rice plant at different growth stages. Soil Science and Plant Nutrition 35 (3): 347-356.
27. Jiang, W., Struik, P. C., Lingna, J., Van Keulen, H., Ming, Z. and Stomph, T. J. 2007. Uptake and distribution of root-applied or foliar-applied 65Zn after flowering in aerobic rice. Annals of Applied Biology 150 (3): 383-391.
28. Joukar, M., Nasiri, M., Kheyri, N., and Habibi, M. 2016. Effect of time of foliar application and type of liquid fertilizer on quantitative and qualitative yield of ratoon rice (var. Tarom). Journal of Plant Ecophysiology 8 (25): 161-169. (in Persian with English abstract).
29. Kamenidou, S., Cavins, T. J., and Marek, S. 2010. Silicon supplements affect floricultural quality traits and elemental nutrient concentrations of greenhouse produced gerbera. Scientia Horticulturae 123 (3): 390-394.
30. Kato, N., and Owa, N. 1990. Dissolution mechanism of silicate slage fertilizer in paddy Soil. Soil Science 4: 609-610.
31. Khabbazkar, M. R., Gohari, A. A., Dargah, R. E., Khonok, A., and Sabet, H. S. 2012. Reaction of rice (*Oryza Sativa*) cultivars to silica and potassium fertilizer. International Journal of Farming and Allied Sciences 1: 4. 108-113.
32. Kheyri, N., Ajam-Norouzi, H., Mobasser, H. R., and Torabi, B. 2018. Evaluation of the effect of foliar and soil application of zinc and silicon nanoparticles on some physiological traits of rice (*Oryza sativa* L.). 12 (48): 52-64. (in Persian with English abstract).
33. Kheyri, N., Ajam-Norouzi, H., Mobasser, H. R., and Torabi, B. 2019a. Effects of silicon and zinc nanoparticles on growth, yield, and biochemical characteristics of rice. Agronomy Journal 111: 1-7 .
34. Kheyri, N., Ajam-Norouzi, H., Mobasser, H. R., and Torabi, B. 2019b. Comparison of NPs foliar application of silicon and zink with soil application on agronomic and physiological traits of rice (*Oryza sativa* L.). Iranian Journal of Field Crops Research 17 (3): 503-515. (in Persian with English abstract).
35. Koochaki, A., and Sarmadnia, Gh. H. 2013. Physiology of crop plant (Translation). Ferdowsi University of Mashhad Press Mashhad, Iran. 400 p. (in Persian).
36. Lavinsky, A. O., Detmann, K. C., Reis, J. V., Ávila, R. T., Sanglard, M. L., Pereira, L. F., and DaMatta, F. M. 2016. Silicon improves rice grain yield and photosynthesis specifically when supplied during the reproductive growth stage. Journal of Plant Physiology 206: 125-132.
37. Liang, Y. C., Wong, J. W., and Long, W. 2005. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. Chemosphere 58: 475-483.
38. Lobato, A. K. S., Luz, L. M., Costa Santos, R. C. L., Filho, B. G., Meirelles, A. C. S., Oliveira Neto, C. F., Laughinghouse, H. D., Neto, M. A. M., Alves, G. A. R., Lopes, M. J. S., and Neves, H. K. B. 2009. Si exercises influence on nitrogen components in pepper subjected to water deficit? Research Journal of Biology and Science 4: 1048-1055.

39. Ma, J. F., and Takahashi, E. 2002. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier Science. 294 pp.
40. Ma, J. F., Nishimura, K., and Takahashi, E. 1989. Effect of silicon on the growth of rice plant at different growth stages. Soil Sciences and Plant Nutrition 35 (3): 347-356.
41. Mahmodi, B., Moballeghi, M., Eftekhari, A., and Neshaie-Mogadam, M. 2019. Investigation of foliage application of nutrients in yield and yield components of high yielding rice of sahel cultivar. Crop Physiology Journal 11 (44): 23-41. (in Persian with English abstract).
42. Mahmoud-Soltani, Sh., Allahgholipoor, M., Shakouri Katigari, M., and Poursafar-Tabalvandani, A. 2020. Effect of basal and foliar application of zinc sulphate fertilizer on zinc uptake, yield and yield components of rice (Hashemi Cultivar). Iranian Journal of Soil and Water Eesearch 51 (4): 1013-1026. (in Persian with English abstract).
43. Mahmoud-Soltani, S. 2019. Quantitative and qualitative improvement of rice grain in paddy field through macro and micronutrient management strategies (focus on phosphorus and zinc). Final project report. Rice research institute of Iran. Rasht. Iran. (in Persian).
44. Mazaherinia, S., Astaraei, A. R., Fotovat, A., and Monshi, A. 2010. Effect of nano iron oxide particles on Fe, Mn, Zn and Cu concentrations in wheat plant. Journal of World Applied Sciences 7 (1): 156-162.
45. Moaveni, P., and Kheiri, T. 2011. TiO_2 nano particles affected on maize (*Zea mays* L.). 2nd international conference on agricultural and animal science in Singapore by international proceeding of chemical, biological and environmental engineering. International Association of Computer Science and Information Technology Press. 22: 160-163.
46. Mohaghegh, P., Shirvani, M., and Ghasemi, S. 2010. Silicon Application Effects on Yield and Growth of Two Cucumber Genotypes in Hydroponics System. Journal of Soil and Plant Interactions 1 (1): 35-40. (in Persian with English abstract).
47. Nair, R., Hanna-Varghese, S., Nair, B. G., Maekawa, T., Yoshida, Y., and Sakthi kumar, D. 2010. Nanoparticulate material delivery to plants. Plant Science 179: 154-163.
48. Panam, Z., Astaraei, A., and Lakzian, A. 2016. Effect of zinc oxide (nano and ordinary) and *Glomus intraradices* fungi on yield components and concentration of micronutrients in green bean plant. Journal of Soil and Plant Interactions 7 (2): 71-83. (in Persian with English abstract).
49. Pati, S., Pal, B., Badole, S., Hazra, G. C., and Mandal, B. 2016. Effect of silicon fertilization on growth, yield, and nutrient uptake of rice. Communications in Soil Science and Plant Analysis 47: 284-290.
50. Peyvandi, M., Parande, H., and Mirza, M. 2011 Comparison of Nano Fe Chelate with Fe Chelate Effect on Growth Parameters and Antioxidant Enzymes Activity of *Ocimum Basilicum*. New Cellular and Molecular Biotechnology Journal 1 (4): 89-98. (in Persian with English abstract).
51. Prasad, T. N., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Raja Reddy, K., Sreeprasad, T. S., Sajanlal, P. R., and Pradeep, T. 2012. Effect of nanoscales Zinc Oxide on the germination, growth and yield of peanut. Journal of Plant Nutrition 35: 905-92.
52. Radhika, K., Hemalatha, S., Maragatham, S., and Praveena, S. 2013. Effect of foliar application of micronutrients on the yield components of rice and soil available micronutrients status. Asian Journal of Soil Science 8 (2): 419-421.
53. Rehman, H. U., Aziz, T., Farooq, M., Wakeel, A., and Rengel, Z. 2012. Zinc nutrition in rice production systems: a review. Plant and Soil 361 (1-2): 203-226.
54. Sainz, M. J., Taboada-Castro, M. T., and Vilarino, A. 1998. Growth, mineral nutrition and mycorrhizal colonization of red clover and cucumber plants grown in a soil amended with composted urban wastes. Plant and Soil 205 (1): 85-92.
55. Salardini, A. A. 1995. Soil fertility (Compilation), Tehran University Press, 460 p. (in Persian).
56. Savvas, D., and Ntatsi, G. 2015. Biostimulant activity of silicon in horticulture. Scientia Horticulture 196: 66-81.
57. Sedaghat, N., Pirdashti, H., Fallah-Shamsi, S. A., Ranjbar, A., and Leilayi, S. 2014. Effect of Silicon, Potassium and Zinc Foliar Application on some Agronomic Characteristics, Blast and Stem Borer (*Chilo suppressalis* Walker) Control in Rice (cv. Tarom Hashemi). Journal of Plant Protection 28 (4): 525-531. (in Persian with English abstract).
58. Seghatoleslami, M. J., and Forutani, R. 2015. Yield and water use efficiency of sunflower as affected by nano Zno and water stress. Journal of Advanced Agricultural Technologies 2 (1): 34-37.
59. Shaygany, J., Peivandy, N., and Ghasemi, S. 2012. Increased yield of direct seeded rice (*Oryza sativa* L.) by foliar fertilization through multi-component fertilizers. Archives of Agronomy and Soil Science 58 (10): 1091-1098.
60. Shivay, Y. S., Prasad, R., Kaur, R., and Pal, M. 2016. Relative efficiency of zinc sulphate and chelated zinc on zinc biofortification of rice grains and zinc use-efficiency in Basmati rice. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B, Biological Sciences 86 (4): 973-984.
61. Sinclair, T. R. 2011. Challenges in breeding for yield increase for drought. Trends in Plant Science 16: 289-293.
62. Torabian, Sh., and Zahedi, M. 2013. Effects of foliar application of common and nano-sized of iron sulphate on the growth of sunflower cultivars under salinity. Iranian Journal of Field Crop Science 44 (1): 109-118. (in Persian

with English abstract).
63. Tuyogon, D. S. J., Impa, S. M., Castillo, O. B., Larazo, W., and Johnson-Beebout, S. E. 2016. Enriching rice grain zinc through zinc fertilization and water management. Soil Science Society of America Journal 80 (1): 121-134.
64. Wang, S., Wang, F., and Gao, S. 2015. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings. Environmental Science and Pollution Research 22 (4): 2837-2845.
65. Whitty, E. N., and Chambliss, C. 2005. Fertilization of field and forage Crops. Nevada State University Published. 21 pp. 38.
66. Wu, C. Y., Lu, L. L., Yang, X. E., Feng, Y., Wei, Y. Y., Hao, H. L., Stoffella, P. J., and He, Z. L. 2010. Uptake, translocation, and remobilization of zinc absorbed at different growth stages by rice genotypes of different Zn densities. Journal of Agricultural and Food Chemistry 58 (11): 6767-6773.
67. Yazdpour, H., Noormohamadi, Gh., Madani, H., Heidari-Sharifabad, H., and Mobasser, H. R. 2014a. Role of nano-silicon and other silicon resources with nitrogen and phosphorus application on yield and yield components of rice (*Oryza sativa* L.). Trends in Life Sciences 3: 36-41.
68. Yazdpour, H., Noormohamadi, Gh., Madani, H., Heidari-Sharifabad, H., Mobasser, H. R., and Oshri, M. 2014. Role of nano-silicon and other silicon resources on straw and grain protein, phosphorus and silicon contents in Iranian rice cultivar (*Oryza sativa* cv. Tarom). International Journal of Biosciences 5 (12): 449-456.
69. Yoshida, S. 1981. Fundamentals of Rice Crop Science. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute. (Managing Editor: LI Guan).
70. Yuva Raj, M., and Subramanian, K. S. 2014. Fabrication of zinc nano fertilizer on growth parameter of rice. BioScience Trends 7: 2564-2565.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 19, No. 1, Spring. 2021, p. 73-89

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، ص. ۸۹-۷۳

Effects of Foliar Application of Potassium Silicate and Nanoparticles (silicon + zinc) in Different Stages of Growth and Development on Quantitative Yield and Grain Enrichment of Rice (*Oryza sativa* L.)

M. Sheykhzadeh[1], H. Mobasser[2*], E. Rahimi Petrodi[3], Mo. Rezvani[4]

Received: 23-10-2020
Accepted: 26-01-2021

Introduction: Rice (*Oryza sativa* L.) is one of the three major food crops worldwide. Approximately 50% of the world's population uses rice as a staple food. Silica and zinc among nutrients play a key role in improving plant nutrition and increasing rice growth, so that a lack of these elements reduces growth and consequently reduces yield. Also fortifying rice with silicon and zinc can correct deficiencies of these elements in humans who consume rice.

Materials and Methods: This experiment was conducted as factorial based on a randomized complete block design with three replications at the private farm located in Babol (North of Iran) during the years 2017-18 and 2018-19. Measured values of electrical conductivity, soil acidity, organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, available potassium, zinc content and soil texture for the first and second years were 2.33 dS m^{-1} and 1.27 dS m^{-1}, 7.48 and 7.26, 3.27 % and 2.16 %, 0.32 % and 0.21 %, 11 mg kg^{-1} and 6 mg kg^{-1}, 320 mg kg^{-1} and 238 mg kg^{-1}, 0.96 mg kg^{-1} and 0.89 mg kg^{-1}, Clay and Clay, respectively. The treatment included three levels of foliar application (Potassium silicate, Silicon nanoxide, and Zinc nanoxide) as the first factor and five levels of developmental stages (T_1: beginning of tillering + middle of tillering + late of tillering + end of panicle emergence, T_2: middle of tillering + late of tillering + end of panicle emergence, T_3: late of tillering + end of panicle emergence, T_4: late of tillering and T_5: end of panicle emergence) as the second factor.

Results and Discussion: The results showed that none of the studied traits were affected by the year. Maximum grain yield was obtained by foliar application silicon nanoxide (7733 kg ha^{-1}) and zinc nanoxide (7498 kg ha^{-1}), which was, respectively, due to increasing the total number of spikelets and the percentage of filled spikelets (1420.0 spikelets and 95.53%, respectively) and increasing the total number of tillers and 1000-grain weight (19.73 tillers and 26.80 g, respectively). The highest grain yield (7716, 7700 and 7492 kg.ha^{-1}) and the percentage of filled spikelets (94.83, 94.72 and 93.89%) were obtained under T_1, T_2 and T_3 treatments, respectively. By foliar application of silicon nanoxide and zinc nanoxide, the highest biological yield (19213 and 18986 kg ha^{-1}, respectively) and, the highest grain silica concentration (3.13%) and grain zinc concentration (15.97 mg kg^{-1}) were recorded. The minimum 1000-grain weight (24.11 and 24.00 g), the maximum total number of spikelets per panicle (143.1 and 143.2 spikelets) and the highest concentration of grain silica (3.00 and 2.97%) were obtained under T_1 and T_2 treatments, respectively. However, the highest total number of tillers per hill and the highest number of grain were obtained under T_1 and T_2 treatments, respectively. The interaction between treatments showed that the maximum total number of spikelets per panicle was obtained by foliar application of potassium silicate under T_1 treatment (151.5 spikelets) and foliar application of silicon nanoxide under T_2 treatment (153.3 spikelets). Also, the highest concentrations of silica and zinc in grain were obtained by foliar application of silicon nanoxide under T_1 treatment (3.97%) and zinc nanoxide under T_2 treatment (21.67 mg kg^{-1}), respectively.

Conclusions: According to the results of this study, we found that grain yield increases with the application of nanoparticles as well as foliar application during crop growth and development. In order to enrich rice grains, foliar application of nanoparticles in the middle of tillering, late of tillering and end of panicle emergence is also necessary.

Keywords: Grain silica, Grain yield, Grain zinc, Nanofertilizer

---

1- Ph.D. Student, Department of Agronomy, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran
2- Assistant Professor, Department of Agronomy, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran
3- Assistant Professor, Department of Agronomy, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran
4- Associate Professor, Department of Agronomy, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran
(*- Corresponding Author Email: drmobasser.neg@gmail.com)